

球形二氧化硅微粒表面特性调控对电子封装用环氧树脂复合材料性能的影响

张丽丽^{1,2}, 胡海军¹, 李厚文³, 聂兴成², 李斌³, 张海琳^{1,2}, 胡乔巨²,
郑德州³, 张国庆³, 井金峰³, 刘文星^{1,2}, 高长有^{1,2}

(1. 浙江大学高分子科学与工程学系, 教育部高分子合成与功能构造重点实验室, 杭州 310058;
2. 浙江大学绍兴研究院大健康材料分中心, 医用高分子材料与器械表界面技术浙江省工程研究中心,
绍兴市大健康材料与应用技术重点实验室, 绍兴 312099;
3. 周口莲花控股股份有限公司, 周口 466200)

摘要 系统研究了硅烷偶联剂(SCA)界面改性对二氧化硅微粒/环氧树脂复合材料性能的影响. 通过表面能谱分析验证了硅烷偶联剂在二氧化硅微粒表面的成功接枝, 并制备了高填料含量(质量分数, 50%)的环氧树脂基封装膜, 对比了SiO₂改性前后所得复合材料的综合性能. 研究表明: 由于环氧基团参与树脂交联反应, γ -(2,3-环氧丙氧基)丙基三甲氧基硅烷(KH-560)显著提升了界面结合强度, 对应复合材料的玻璃化转变温度(170.38 °C)、导热系数(0.15 W/mK)及拉伸强度(102.79 MPa)均最高; 由于苯环的疏水性与共轭效应, *N*-苯基-3-氨基丙基三甲氧基硅烷(KBM-573)赋予复合材料最大的水接触角(114.9°), 但力学性能略低; 由于氨基极性, γ -氨基丙基三甲氧基硅烷(KH-540)改性体系导致材料介电性能与疏水性改善有限. 研究表明, 改性二氧化硅微粒对“力学-热学-电学”性能具有协同作用, 为电子封装材料的性能定向优化提供了理论依据.

关键词 硅烷偶联剂; 二氧化硅微粒改性; 电子封装; 环氧树脂; 介电损耗

中图分类号 O633 文献标志码 A doi: 10.7503/cjcu20250145

Effects of Surface Modification Strategies of Spherical Silica Particles on Properties of Epoxy Resin Composites for Electronic Packaging

ZHANG Lili^{1,2}, HU Haijun¹, LI Houwen³, NIE Xingcheng², LI Bin³,
ZHANG Hailin^{1,2}, HU Qiaoju², ZHENG Dezhou³, ZHANG Gouqing³,
JING Jinfeng³, LIU Wenxing^{1,2*}, GAO Changyou^{1,2*}

(1. MOE Key Laboratory of Macromolecular Synthesis and Functionalization,
Department of Polymer Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;
2. Zhejiang Engineering Research Center for Interface Technology of Medical Polymers and Devices,
Shaoxing Key Laboratory of Healthcare Materials and Application Technology, Center for Healthcare Materials,
Shaoxing Institute, Zhejiang University, Shaoxing 312099, China;
3. Zhoukou Lotus Holdings Co., Ltd., Zhoukou 466200, China)

Abstract The effect of silane coupling agent (SCA) interfacial modification on the properties of silica particles/

收稿日期: 2025-05-18. 网络首发日期: 2025-06-24.

联系人简介: 高长有, 男, 博士, 教授, 主要从事组织修复与再生材料、自适应性生物材料、生物材料表界面改性、纳米生物材料和医疗器械研发方面的研究. E-mail: cygao@zju.edu.cn

刘文星, 男, 博士, 副研究员, 主要从事动态聚合物、刺激响应聚合物、可循环聚合物、可降解聚合物、生物医用高分子材料方面的研究. E-mail: wenxingliu@zju.edu.cn

基金项目: 浙江省自然科学基金(批准号: ZCLMS25B0203)资助.

Supported by the Zhejiang Provincial Natural Science Foundation, China(No.ZCLMS25B0203).

epoxy composites was systematically investigated to address the performance bottlenecks of epoxy resin-based electronic packaging materials in terms of high thermal conductivity, low dielectric loss, and moisture and thermal stability. The successful grafting of silane coupling agents onto the silica particle surface was verified by surface energy spectroscopy analysis, and epoxy resin-based packaging films with high filler content (50%, mass fraction) were prepared to compare the overall performance of the composites before and after modification. The incorporation of γ -glycidyloxypropyltrimethoxysilane (KH-560) enhanced the interfacial bonding strength of resin through the participation of epoxy groups in the cross-linking reaction. The resultant composites exhibited an optimal glass transition temperature of 170.38 °C, a thermal conductivity of 0.15 W/mK, and a tensile strength of 102.79 MPa. The resin prepared by using *N*-phenyl-3-aminopropyltrimethoxysilane (KBM-573)-modified silica particles exhibited a water contact angle of 114.9° and slightly lower mechanical properties due to the hydrophobicity of the benzene ring and conjugation effect. The γ -aminopropyltrimethoxysilane (KH-540)-modified system demonstrated limited improvement in dielectric properties and hydrophobicity due to the amine polarity. The present study elucidated the synergistic effect of modified silica particles on the mechanical, thermal, and electrical properties. This finding provides a theoretical basis for the targeted optimization of electronic packaging materials.

Keywords Silane coupling agent; Silica particle modification; Electronic packaging; Epoxy resin; Dielectric loss

随着5G通信、大功率集成电路和先进封装技术的快速发展,电子封装材料正面临着多维性能极限的挑战^[1,2]。一方面,第三代半导体器件的工作功率密度超过5 W/mm,这就要求封装基底材料具有高导热性和优异的热机械稳定性^[3-5];另一方面,毫米波信号传输要求介电材料在高频电场下保持低介电常数和低损耗因子^[6],同时在高湿度环境下保持低吸水性,以防止材料失效^[7]。环氧树脂因其可调整的固化网络和工艺兼容性,仍是电子封装的主流基体材料^[8-11],但其固有的低导热性和高交联脆性严重限制了其在先进封装中的应用^[12-14]。

二氧化硅微粒(SiO₂)因其低介电常数、低热膨胀系数和低成本^[15],已成为提高环氧树脂性能的首选填料^[16]。然而,纳米级SiO₂颗粒的表面能较高^[17],容易发生团聚,从而在复合材料中形成应力集中缺陷^[18]。此外,未改性的SiO₂微粒和环氧树脂仅通过物理吸附作用结合在一起,在湿热环境下界面水解、脱粘和降解会导致介电损耗增加^[19]。这种界面失效问题已成为开发高可靠性封装材料的核心挑战。硅烷偶联剂(SCA)具有独特的双官能团结构[Y-R-Si(OR')₃],为解决界面相互作用难题提供了一种有效的方法^[20]。Si-OR'基团可与SiO₂微粒表面的羟基发生水解和缩合过程,从而形成Si—O—Si共价键。此外,另一端Y官能团(如氨基和环氧基)也能通过特定的化学反应与环氧树脂发生作用,从而形成坚固的有机-无机界面相。近年来,研究人员初步探索了具有不同官能团的硅烷偶联剂的改性效果^[21,22],但大多数研究都集中在单一性能指标的优化上,缺乏对“力学、热学和电学”协同机制的系统比较分析^[23]。

为解决上述问题,本文选择了 γ -(2,3-环氧丙氧基)丙基三甲氧基硅烷(KH-560)、 γ -氨基丙基三甲氧基硅烷(KH-540)和*N*-苯基-3-氨基丙基三甲氧基硅烷(KBM-573)3种典型硅烷偶联剂,评估了不同硅烷偶联剂对二氧化硅微粒/环氧树脂复合材料的机械性能、热性能和介电性能的影响,旨在为电子封装材料的“按需设计”提供实验依据,以促进高性能环氧树脂复合材料的开发,并将其应用于高通信、大功率设备及人工智能芯片等尖端领域。

1 实验部分

1.1 试剂与仪器

双酚A型环氧树脂、苯酚芳烷基环氧树脂、线性邻甲酚甲醛树脂,工业级,山东圣泉新材料股份有限公司;球形二氧化硅微粒(SiO₂,型号:SC2500-SQ),工业级,日本雅都玛公司;硅烷偶联剂KH-560、KH-540和KBM-573,工业级,杭州杰西卡化工有限公司;2-乙基-4-甲基咪唑,纯度≥96%,上海阿拉丁生化科技股份有限公司;丁酮和甲醇,分析纯,国药集团化学试剂有限公司。

SU8600型场发射扫描电子显微镜(SEM),日本日立公司,加速电压5 kV;DMA850型动态热机械分析仪(DMA),美国TA公司,采用拉伸模式,温度范围为25~250 °C,升温速率为3 °C/min;TMA450型热机械分析仪热膨胀仪(TMA),美国TA公司;TPS 2500S型导热系数仪,瑞典Hot Disk公司;34SC-1型万能材料试验机,美国Instron公司,拉伸速率2 mm/min,每个样品重复5次,结果取平均值;N5227B型矢量网络分析仪,美国Keysight公司,采用谐振腔法测试介电常数和介电损耗,频率5 GHz;DSA100S型接触角测量仪,德国Kruss公司.

1.2 实验过程

1.2.1 SiO₂微粒的改性 采用甲醇与去离子水按照体积比9:1配制混合溶剂体系,按照硅烷偶联剂用量为二氧化硅微粒质量的3%,分别加入KH-560, KH-540和KBM-573,超声水解20 min后加入球形SiO₂微粒,室温下磁力搅拌12 h;反应结束后离心洗涤,然后将粉体于80 °C真空干燥12 h,得到表面功能化改性的球形SiO₂材料,分别标记为SiO₂@KH560, SiO₂@KH540和SiO₂@KBM573.

1.2.2 环氧树脂基封装膜的制备 将双酚A型环氧树脂、苯酚芳烷基环氧树脂、线性邻甲酚甲醛树脂(固化剂)、三苯基磷(固化促进剂)和SiO₂微粒均匀分散于丁酮中,制备成环氧树脂复合材料清漆.其中,双酚A型环氧树脂与苯酚芳烷基环氧树脂按照环氧基摩尔比(环氧值)1:1加入,固化剂按照羟基与环氧基摩尔比1:1加入,固化促进剂为环氧树脂总质量的0.5%,未改性或改性SiO₂微粒的质量分数为原料总质量的50%.将上述树脂清漆涂布于75 μm厚度的聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)离型膜上,于60 °C干燥1 h,得到环氧树脂基电子封装膜,随后在该膜上方覆上15 μm厚的聚丙烯膜,得到环氧树脂基封装膜材料,根据所用SiO₂微粒的不同,分别标记为SiO₂, SiO₂@KH560, SiO₂@KH540和SiO₂@KBM573环氧树脂基封装膜.

1.2.3 环氧树脂基封装膜的固化 将上述环氧树脂基封装膜材料脱去聚丙烯膜放在烘箱中,于100 °C预固化1 h,再于150 °C固化1 h,脱除PET膜后得到环氧树脂基封装膜的固化试样,测试其热性能、拉伸性能和介电性能等.

2 结果与讨论

2.1 球形二氧化硅微粒的改性

不同硅烷偶联剂改性的球形SiO₂微粒的SEM照片、表面元素EDS能谱图和表面元素对应的质量分数如图1和图2所示.未改性SiO₂微粒以Si(45.78%)和O(51.80%)元素为主,C元素含量仅2.43%.当引入硅烷偶联剂改性后, SiO₂@KH560, SiO₂@KH540和SiO₂@KBM573中C元素质量分数分别达到11.33%, 7.04%和10.29%,增幅达到323%~366%,说明偶联剂分子成功修饰到SiO₂微粒表面.这一变化规律与硅烷偶联剂结构对应:KH-560和KBM-573含有环氧基团和苯环,可以引入更多有机碳链;而KH-540的氨丙基结构相对简单,其表面C元素含量增加较少.

2.2 环氧树脂基封装膜的热性能

环氧树脂基封装薄膜从玻璃态转变为高弹态的温度决定了材料在高温下的稳定性^[24].通过DMA测试环氧树脂基封装薄膜的耐热性能,图3示出其tanδ曲线,在升温过程中的峰值可以表示该材料的玻璃化转变温度(T_g).从图3可以看出,使用改性后二氧化硅微粒制备的环氧树脂基封装膜的玻璃化转变温度均高于未改性二氧化硅微粒环氧树脂封装膜,表明该体系具有优异的耐热性.其中KH-560改性的二氧化硅微粒环氧树脂封装膜的玻璃化转变温度达到170.38 °C.这可能是由于硅烷偶联剂KH-560中的环氧基团能够参与环氧树脂固化,形成更强的交联网络,界面结合更好,从而提升 T_g ^[25].

电子封装材料通常会经历温度变化,比如焊接过程或设备运行时的高温.如果电子封装膜的膨胀率与周围材料(如硅芯片、铜导线或基板)不匹配,热胀冷缩会导致内部应力,长期下来可能引起分层或翘曲,影响电子封装膜的可靠性和寿命^[26,27].平均热膨胀系数(CTE, K⁻¹)是衡量材料在温度变化时尺寸相对变化量的物理指标,通过热机械分析仪来测试(图4),具体CTE数值列于表1中.4组环氧树脂基封装膜均具有较低的热膨胀系数,是优秀的介质材料.

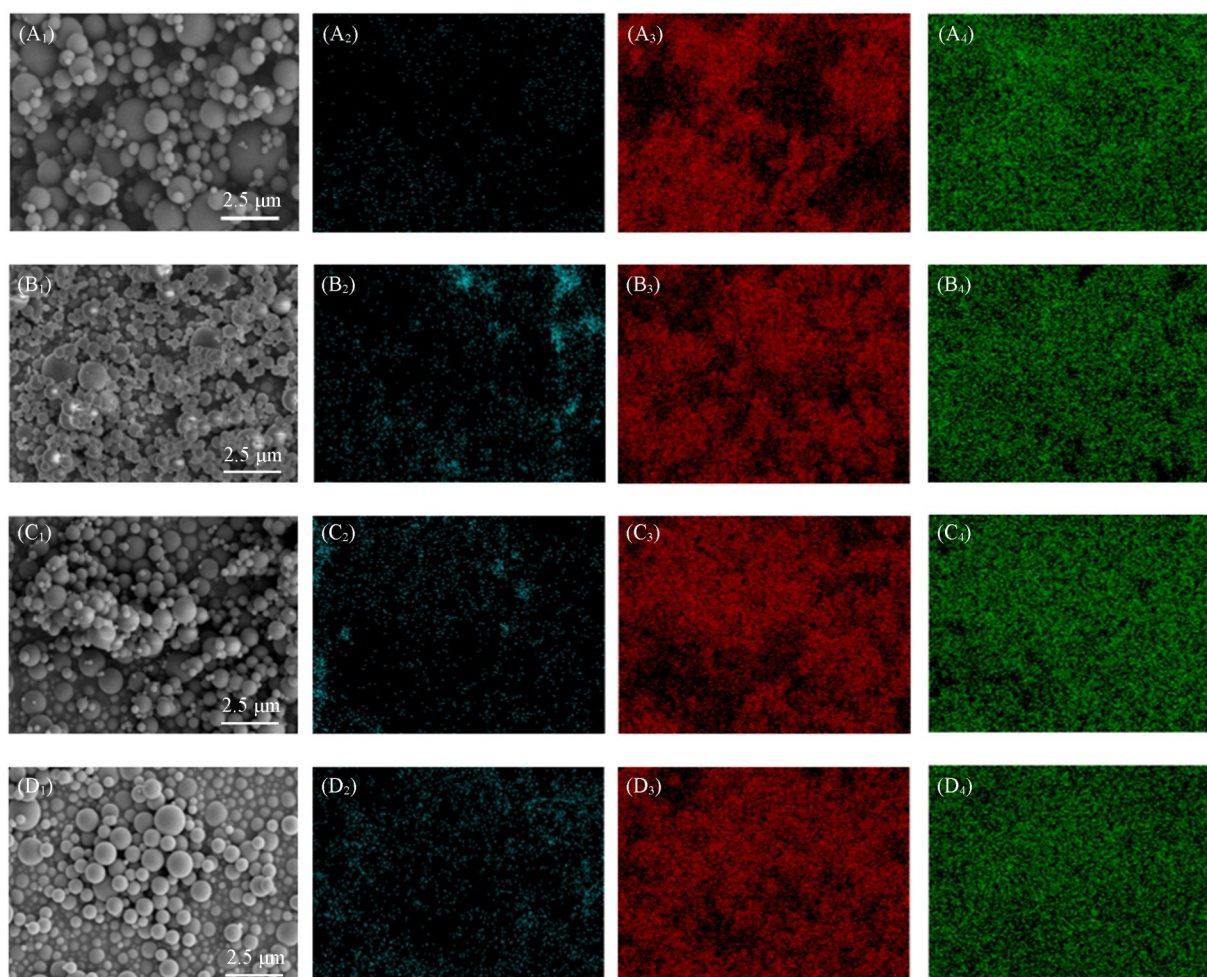


Fig. 1 SEM images(A₁—D₁) and EDS mapping images(A₂—D₂, A₃—D₃, A₄—D₄) of SiO₂ particles modified by different silicone coupling agents(SCA)

(A₁—A₄) SiO₂; (B₁—B₄) SiO₂@KH560; (C₁—C₄) SiO₂@KH540; (D₁—D₄) SiO₂@KBM573. (A₂—D₂) C; (A₃—D₃) O; (A₄—D₄) Si.

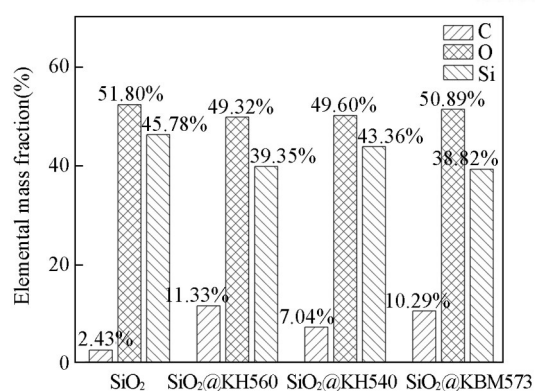


Fig. 2 Mass fraction of surface elements of SiO₂ particles modified by different SCA

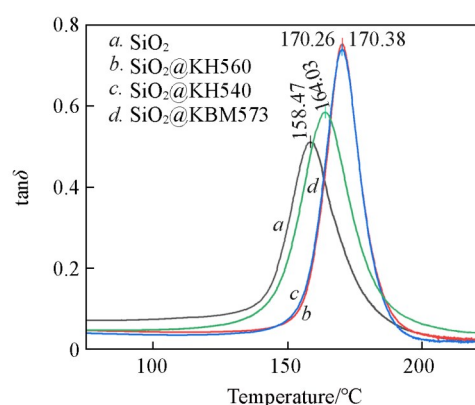


Fig. 3 DMA curve of epoxy resin-based encapsulation films(heat up at 3 °C/min, in air)

电子封装材料的导热系数直接影响高频率设备的散热性能,高导热系数有助于降低热阻,提高散热效率,防止过热失效^[28].图5结果表明KH-560改性的SiO₂微粒能参与固化反应,形成强界面结合,降低热阻,所以对应环氧树脂基封装膜的导热系数最高.而未改性SiO₂微粒的界面热阻大,对应环氧树脂基封装膜的导热系数只有0.0671 W/mK.

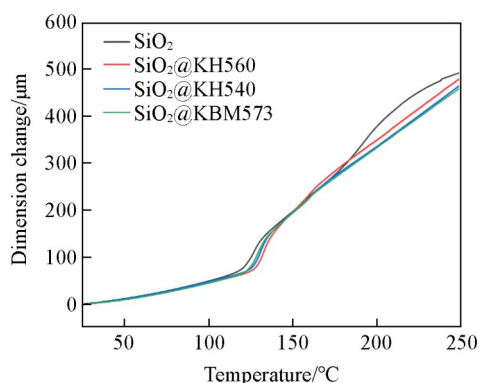


Fig. 4 CTE curves of epoxy resin-based encapsulation films

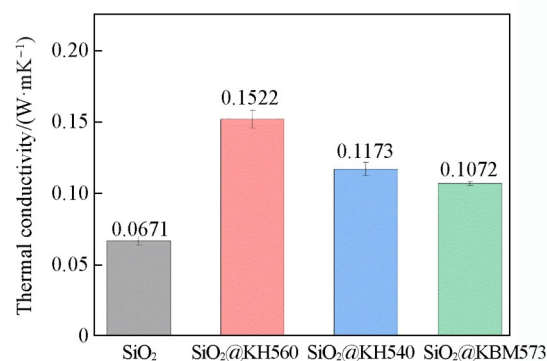


Fig. 5 Thermal conductivity of epoxy resin-based encapsulation films

Table 1 T_g , CTE data and mechanical properties of epoxy resin-based packaging films

Film	$T_g/^\circ\text{C}$ (by tensile TMA)	CTE/ K^{-1}		Tensile strength/MPa	Tensile modulus/GPa	Elongation at break (%)
		$<T_g$	$>T_g$			
SiO ₂	122.54	55.55	192.32	76.24±9.22	4.69±0.32	2.30±0.36
SiO ₂ @KH560	128.27	50.86	224.76	102.79±12.11	6.08±0.73	3.50±0.52
SiO ₂ @KH540	126.97	53.50	200.17	95.51±2.65	5.60±0.14	3.33±0.25
SiO ₂ @KBM573	124.48	52.42	194.33	93.53±2.87	4.74±0.21	3.77±0.44

2.3 环氧树脂基封装膜的力学性能

电子封装材料需要足够的强度来支撑整个封装结构(包括芯片、基板和其它组件),避免其在制造或使用过程中出现裂纹或断裂,导致电路失效^[29]. 通过万能材料试验机对环氧树脂基封装膜进行拉伸试验,研究了不同硅烷偶联剂改性的SiO₂微粒对封装膜力学性能的影响,结果如图6和表1所示. 由表1可以看出,未改性SiO₂微粒因界面结合弱或分散性差导致封装膜的力学性能下降;硅烷偶联剂改性SiO₂微粒可以通过增强填料-树脂界面结合,提升交联密度和应力传递效率,显著提高封装薄膜的拉伸强度与模量;而KBM-573由于苯环活性差、位阻大,界面结合可能较差,对应的改性环氧树脂基封装膜的力学性能稍低.

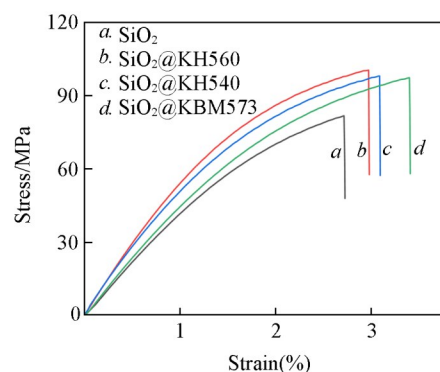


Fig. 6 Tensile strength and elongation at break of epoxy resin-based packaging films

2.4 环氧树脂基封装膜的介电性能

介电常数和介电损耗是电介质材料在交变电场中的两个重要性能指标. 介电常数衡量材料储存电荷的能力,低介电常数可减少信号延迟;介电损耗表征材料在交变电场中因极化滞后和电导引起的能量耗散. 因此,低介电常数和低介电损耗对减少信号延迟和低频信号完整性至关重要^[30]. 使用矢量网络分析仪在5 GHz频率下测试制备的环氧树脂基封装膜的介电性能(图7),4组材料均具有较低的介电常数和介电损耗. 在未改性的SiO₂微粒/环氧树脂体系中, SiO₂微粒表面羟基的亲水性使其与疏水树脂的界面结合差,形成大量微观缺陷(如孔隙、微裂纹),加剧界面极化,因此其对应的封装膜介电损耗最高. 同时,因为苯环具有共轭结构且位阻大,会增加材料在电场中的能量耗散,由KBM-573改性的SiO₂微粒制备的封装膜介电损耗为0.0138,高于KH-560和KH-540改性SiO₂微粒制备的封装膜. 总体来看,本文中使用的改性SiO₂微粒制备的环氧树脂基封装膜均可以保持较低的介电损耗,具有优异的介电性能.

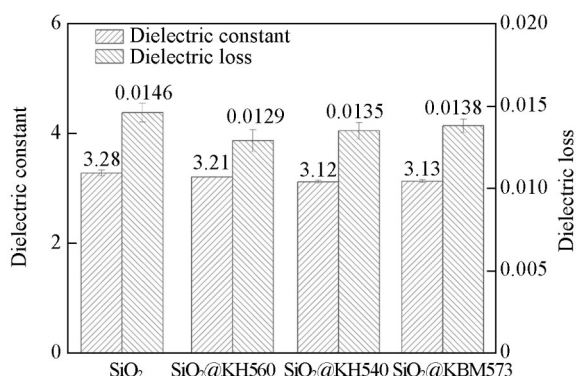


Fig. 7 Dielectric properties of epoxy resin-based packaging films

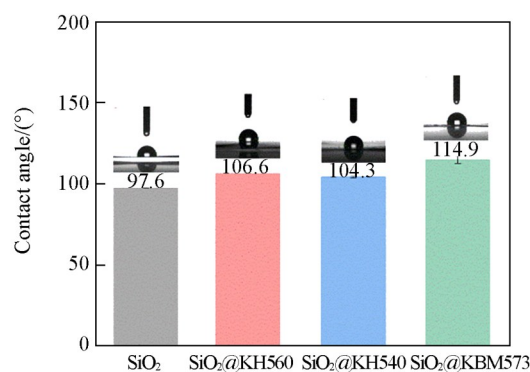


Fig. 8 Contact angle photographs and data of epoxy resin-based packaging films

2.5 环氧树脂基封装膜的水接触角

电子封装材料的疏水性能会影响薄膜的电气性能、机械可靠性和长期寿命^[31]。由图8可见,未改性SiO₂微粒表面羟基极性大,易吸附水分,硅烷偶联剂的引入能有效提升环氧树脂基封装膜的疏水性。其中,KBM-573中的苯基作为疏水基团能进一步提供疏水性,对应封装膜的水接触角提升至114.9°。KH-540中的氨基具有一定极性,对环氧树脂基电子封装膜疏水性能的提升程度不大。

3 结 论

硅烷偶联剂界面修饰能有效抑制SiO₂微粒的团聚(50%,质量分数),降低材料内部缺陷密度,3种SCA(KH-560, KBM-573和KH-540)因其官能团的不同,对二氧化硅微粒/环氧树脂复合材料的性能产生了差异化影响。KH-560的环氧基团通过共价交联显著增强了界面结合强度,使材料兼具高玻璃化转变温度(170.38℃)、优异导热性(0.15 W/mK)和力学强度(拉伸强度102.79 MPa),这种“力学-热学”协同优化特性使其成为高功率半导体封装、高频电路板及汽车电子等极端热力学环境下的理想选择。KBM-573的苯环结构赋予材料疏水性(水接触角114.9°)和低介电损耗(0.0138),但其位阻效应导致材料力学性能提升有限,更适合户外电子器件、医疗植入体及高频微波组件等对绝缘性与耐湿性要求严苛的场景。KH-540的氨基虽能优化界面相容性并降低介电损耗(0.0135),但其亲水性限制了材料在湿热环境下的长期稳定性,因而更适合作为通用型改性方案或预浸料体系的工艺优化选择。这些差异化表明在电子封装材料的实际应用中,需根据目标场景的关键性能指标(如 T_g 、导热系数、介电损耗、机械强度等),通过实验设计优化偶联剂种类、用量及复合工艺参数。未来研究可进一步探索多元官能团协同改性策略或复合填料体系,在保持高填充量的同时实现热-力-电性能的协同提升,以满足高通信与高功率器件对封装材料的多维要求。

感谢周口莲花控股股份有限公司的技术指导和经费支持!

参 考 文 献

- [1] Chen X. W., Jiang T., Li W. G., *Mater. Mech. Eng.*, **2024**, 48(12), 1—8(陈小文, 姜涛, 李文戈. 机械工程材料, **2024**, 48(12), 1—8)
- [2] Li Y., Sun G., Zhou Y., Liu G., Wang J., Han S., *Prog. Org. Coating*, **2022**, 172, 107103
- [3] Wu G., Qi S., Tian G., Wu D., *Eur. Polym. J.*, **2023**, 195, 112249
- [4] Zhao C., Li Y., Liu Y., Xie H., Yu W., *Adv. Compos. Hybrid Mater.*, **2022**, 6(1), 1—26
- [5] You Y., Zhang B., Tao S., Liang Z., Tang B., Zhou R., Yuan D., *Micromachines (Basel)*, **2021**, 12(3), 265
- [6] Zhang G. P., Tian R., Zhang X., Ding X., Wang Y., Xiao C., Zheng K., Liu X., Chen L., Tian X., *Compos. Part B: Eng.*, **2022**, 232, 109611
- [7] He Y., Kabiri M., *J. Therm. Anal. Calorim.*, **2021**, 147(10), 5667—5675
- [8] Wen Y., Chen C., Ye Y., Xue Z., Liu H., Zhou X., Zhang Y., Li D., Xie X., Mai Y. W., *Adv. Mater.*, **2022**, 34(52), e2201023
- [9] Li R., Yang X., Li J., Shen Y., Zhang L., Lu R., Wang C., Zheng X., Chen H., Zhang T., *Mater. Today Phys.*, **2022**, 22, 100594

- [10] Wan Y. J., Li G., Yao Y. M., Zeng X. L., Zhu P. L., Sun R., *Compos. Commun.*, **2020**, *19*, 154—167
- [11] Guo Q., Li G., Zhu P., Xu Z., Zhao T., Sun R., Wong C. P., *Compos. Part B: Eng.*, **2022**, *232*, 110214
- [12] Bian X., Tuo R., Yang W., Zhang Y., Xie Q., Zha J., Lin J., He S., *Polymers (Basel)*, **2019**, *11*(10), 1548
- [13] Zhou X., Xu J., Wu M., Gao J., Zhang J., Zhang Q., Shi Z., Wang B., Xu C., Yang J., *Compos. Part A: Appl. Sci. Manuf.*, **2023**, *170*, 107538
- [14] Du X., Kong H., Xu Q., Li B., Yu M., Li Z., *Polym. Compos.*, **2022**, *43*(4), 2103—2114
- [15] Meng C. C., Huang M., Li Y. C., *Chem. Res. Chinese Universities*, **2023**, *39*(4), 697—704
- [16] Zhou Y., Liu F., Wang H., *Polym. Compos.*, **2015**, *38*(4), 803—813
- [17] Wei L. L., Fan Y. Q., Lin H. F., Che S. A., *Chem. Res. Chinese Universities*, **2024**, *40*(6), 1220—1226
- [18] Tian F., Zhang L., Zhang J., Xiao P., *Compos. Part B: Eng.*, **2017**, *114*, 93—100
- [19] Kango S., Kalia S., Celli A., Njuguna J., Habibi Y., Kumar R., *Prog. Polym. Sci.*, **2013**, *38*(8), 1232—1361
- [20] Jin Z., Han Z., Chang C., Njuguna J., Habibi Y., Kumar R., *Compos. Sci. Technol.*, **2022**, *228*, 109660
- [21] Zhang J. Y., Xu W. B., Zhou Z. F., Ma H. H., Ren F. M., *Polym. Mater. Sci. Engin.*, **2020**, *36*(9), 111—114(张建英, 徐卫兵, 周正发, 马海红, 任凤梅. 高分子材料科学与工程, **2020**, *36*(9), 111—114)
- [22] Wang D., Yu M., Wang Y., Yao Z., Xia A., Li L., Wang D., *J. Appl. Polym. Sci.*, **2024**, *141*(24), e55507
- [23] Tang G., Tao Y., Deng D., Zhang D. X., Zhang S. H., Liu X. Y., Wu Q., Shen H. F., Sun J. J., *Chem. J. Chinese Universities*, **2024**, *45*(4), 20230494(唐刚, 陶熠, 邓丹, 张冬欣, 张诗华, 刘秀玉, 伍强, 沈海峰, 孙俊杰. 高等学校化学学报, **2024**, *45*(4), 20230494)
- [24] Amirova L. M., Andrianova K. A., Gaifutdinov A. M., Amirov R. R., *J. Non-Cryst. Solids*, **2024**, *646*, 123261
- [25] Qian C. G., Tan Q., Li C. Q., Zheng S. L., Sun Z. M., *China Powder Sci. Technol.*, **2022**, *28*(5), 1—10(钱晨光, 谭琦, 李春全, 郑水林, 孙志明. 中国粉体技术, **2022**, *28*(5), 1—10)
- [26] Cheng H. C., Tai L. C., Liu Y. C., *Mater.*, **2021**, *14*(17), 4816
- [27] Chuang W. C., Chen W. L., *Mater.*, **2022**, *15*(1), 323
- [28] Hu Y., Chen C., Wen Y., Xue Z., Zhou X., Shi D., Hu G. H., Xie X., *Compos. Sci. Technol.*, **2021**, *209*, 108760
- [29] Ding S., Fang Z., Yu Z., Wang Q., *ACS Omega*, **2023**, *8*, 32907—32916
- [30] Huangfu M. G., Li Y. D., Zhang Y., Wu H., Zhi X. X., Wu X., Liu J. G., *Insul. Mater.*, **2020**, *53*(8), 1—9(皇甫梦鸽, 李一丹, 张燕, 吴昊, 职欣心, 武晓, 刘金刚. 绝缘材料, **2020**, *53*(8), 1—9)
- [31] Nakamura T., Tabuchi H., Hirai T., Fujii S., Nakamura Y., *J. Appl. Polym. Sci.*, **2020**, *137*(17), 48615

(Ed.: W, K, M)